第 40 卷　第 1 期
2022 年 3 月

天　文　学　进　展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40,　No. 1
Mar., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.01.05

基于光谱和测光数据的双星轨道参数的确定

张思旋[1,2]，刘　超[1,2]，李佳东[1,2]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京 100101； 2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 利用 LAMOST (Large sky Area Multi-Object fiber Spectroscopic Telescope) DR7 和部分 DR8 的中分辨率数据与 Chen 等人[1]的 WISE 食双星的星表进行交叉，得到了 151 颗短周期的太阳型恒星，再选择其中观测次数在 9 次以上，并且相位分布比较均匀的 23 颗星，通过对它们视向速度进行分析，得到了这批样本的轨道周期、质量比、轨道偏心率等轨道参数。通过分析，发现所得到的周期与 WISE 给出的周期基本一致，所以 WISE 的周期是可靠的。之后用 WISE 的周期作为已知量，再去求解其他轨道参数，这样使其他的轨道参数更加准确。选取了其中速度曲线拟合较好的 23 颗食双星，对这批参数的统计性质进行分析，并与 Ragavan 等人[2]的结果进行对比，发现与 Ragavan 等人[2]的结果基本一致，在周期 10 d 以内的星，质量比分布在 0.2~1 范围内基本全覆盖，轨道偏心率都比较小，在 0.2 以下。

关　键　词： 双星；LAMOST；视向速度；轨道参数

中图分类号： P153　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

双星在各种不同质量的恒星系统中都很常见，从星团到整个星系都是如此，一些天文学家甚至认为绝大多数的恒星都处在双星系统中[3−5]。双星有很多种类型，由 Kopal[6, 7]介绍的分类方法，根据其中的一颗或两颗子星是否充满洛希瓣，一般可以分为分离双星、半相接双星和相接双星。当两颗星均未充满洛希瓣时，两颗星独立演化，这被认为是分离双星；有一颗星充满洛希瓣是半相接双星；当两颗星都充满洛希瓣时是相接双星，相接双星两颗星形成公共包层并发生物质转移，两颗星相互作用很强。双星的质量比、各成员星质量、轨道等其他参数可由食双星系统光变曲线的分析以及时域光谱观测来测定。17 世纪，现代天

收稿日期： 2021-03-17；　**修回日期：** 2021-05-27

资助项目： 国家自然科学基金 (11873057)

通讯作者： 刘超，liuchao@nao.cas.cn

文学诞生后不久，人们就认识到双星系统和多星系统的存在，1935 年 Kuiper[8, 9] 最早提出，从理论上看，确定恒星的多重性以及轨道参数的分布非常有价值。恒星的多样性是恒星形成的常见结果。因此，研究双星比和双星系统的主要性质以及它们对初始质量和环境的依赖性是检测该形成过程的有力工具。恒星中双星比的表征和轨道参数的统计研究对于天体物理学的许多领域至关重要。双星的演化不仅对星族的演化有很大影响，而且可以解释许多重要的天体物理学现象，例如 Ia 型超新星，两个黑洞并合的引力波事件等。无论是星团还是整个星系，双星在各种规模的恒星系统中都很丰富。对于双星的统计分析，有利于我们理解恒星在不同环境中的形成与演化。双星的统计性质可以由双星比、质量比分布、轨道周期分布和轨道偏心率分布很好地描述出来，并且通常这些统计性质还与恒星群的年龄、金属丰度以及主星质量有关[5, 10–13]。

研究双星有很多种方法，比如用光变曲线的方法，用视向速度的方法，或者用赫罗图的方法。在双星系统中，由于它们围绕共同质心做轨道运动，它们的投影径向速度的变化，可以在轨道周期确定后，根据轨道相位绘制出来。所以对这样的速度曲线进行分析，就可以确定描述轨道几何形状的量以及与两颗恒星的质量有关的量。之后在 1890 年 Algol 轨道被发现后不久，就在此基础上发展出很多图形化的方法，随着计算机的出现和发展，这些方法都得到了进一步的完善和改进。第一条被成功分析的食双星的光变曲线是圆形轨道的恒星给出，当时的主要技术是由 Russell 和 Shapley 开发出的方法，后来经过 Kopal 的广泛使用并进一步发展，并且定义出了著名的双星分类方案。这之后慢慢探索出用傅里叶方法分析光变曲线，尤其是对于明显的非球形的恒星系统，同时还受到其他相互作用影响的系统。另一方面，计算机的日益强大使研究人员能够考虑在表面亮度分布不均匀的非球形恒星围绕其共同的质量中心旋转时产生光变曲线的问题，发展成了可以考虑到所有当时已知天体物理学的数值模型中合成双星光变曲线的方法。Lucy[18, 19]、Mochnacki 和 Doughty[20, 21]、Rucinski[22] 关于相接双星的工作，Hill 和 Hutchings[23]、Hutchings 和 Hill[24, 25] 以及 Wilson 和 Devinney[26] 关于所有类型双星的工作导致了对于双星的分析方法的巨大变化。他们编写出很多解双星轨道参数的程序，这些程序极大地提高了我们可以确定多种类型的双星系统的物理特性的精度，并促进了对一般双星演化模型的更严格的测试。

近年来，随着大规模天文巡天观测的出现，我们获得了大量恒星的高质量测光、光谱巡天的数据。如 LAMOST[27], SDSS[28, 29], 2MASS[30], Gaia[31] 巡天等，对于这些大样本数据，发展出了针对大样本数据的统计方法来研究双星的性质。使用统计方法，不需要区分每个星是单星还是双星，只需要分析样本的总体统计性质。因此，这些统计方法可以大大增加样本量，研究不同样本的双星性质，如金属丰度、有效温度、双星比、轨道参数等变化。

金属丰度、年龄、质量等都与恒星的形成和演化密切相关，而近年来很多工作都表明这些都与双星的统计性质有非常密切的关联。例如，现在已经有很多证据表明太阳型恒星的密近双星的双星比随着金属丰度的增大而明显减小。Moe 等人[14] 为了能够准确地测量密近双星的双星比与金属丰度的关系，将一些有分歧或者矛盾的结果进行了整体的分析和综合，在校正完备性后，所有不同的密近双星数据集在双星比和金属丰度之间都表现出一致的强反相关性。在他们的研究中使用的样本都是距离小于 10 AU 和轨道周期小于 10^4 d 的双星。

除此之外，密近双星的双星比还会随着有效温度的增大而减小。Gao 等人[15]通过分析 SDSS 和 LAMOST 的恒星光谱的径向速度变化，估计了 F, G, K 型恒星的双星比。他们的样本星的轨道周期都在 1 000 d 以内，SDSS SEGUE 样本星的双星比为 43.0%±2.0%，LAMOST 样本星的双星比为 30.0%±8.0%。

Liu[16]研究了 LAMOST 和 Gaia 在太阳邻域观测到的恒星的双星比，假设质量比分布是幂律的，幂律指数为 γ，发现双星比与 γ 呈现明显的反相关关系。换句话说，具有双星比的恒星群会包含更多较大质量比的双星。以 $\gamma = 1.2$ 为界，高 γ 的恒星质量较小，金属丰度较高；而低 γ 的恒星质量较高，金属丰度较低。高 γ 的恒星双星比与金属丰度呈反相关，与主质量则不相关；同时，低 γ 恒星的双星比与主质量表现出明显的相关性，但与金属丰度没有呈现出明显的相关性。

主序星的双星比还与主星质量有明显的相关性。Duchêne 和 Kraus[17]总结了主序星、褐矮星、主序前星和嵌埋的原恒星的所有经验知识。对于太阳型的恒星和小质量的恒星，轨道周期的分布是单峰的。然而，随着恒星质量的减小，中值间距和宽度分布急剧减小，结果，在 1 ~ 10 AU 范围内恒星的多重性频率不会随着恒星的质量有明显的变化，双星比和其他的重要参数都随着恒星质量平滑变化。

鉴于上述研究结果，我们利用大样本的 LAMOST 数据与 WISE 的数据进行交叉，解出这一批双星的轨道周期、质量比和轨道偏心率，并且分析了双星的轨道周期分布、质量比分布和轨道偏心率分布，之后与 Raghavon 等人[2]的结果进行了对比。

本文结构如下：第 2 章介绍求解双星轨道参数所使用的研究方法和模型；第 3 章介绍使用的数据；第 4 章将此方法应用在这批数据上所得出的结果；最后一章给出总结和展望。

2 研究方法及方法验证

2.1 研究方法

对于圆形轨道的特殊情况，物体围绕质量中心运动的速度是恒定的。但对于偏心轨道的一般情况，速度是位置和时间的连续变化函数。所以椭圆轨道中的速度是位置的强函数，特别是对于非常偏心的轨道。恒星在椭圆轨道上的位置不是时间的简单函数，对于椭圆轨道，描述这种位置和时间的依赖关系的基本方程称为开普勒方程[37]。椭圆轨道的开普勒方程为：

$$E - e\sin E = \frac{2\pi}{P}(t - T) \quad . \tag{1}$$

式 (1) 的右边是直接从观测中确定的，左边只是用弧度度量表示的轨道相位。E 为偏近点角，e 为轨道偏心率，P 为轨道周期，t 为时间，T 为积分常量。并且，我们从椭圆轨道的性质中还非常容易得到：

$$r\cos\theta = a(\cos E - e) \quad , \tag{2}$$

$$r = a(1 - e\cos E) \quad , \tag{3}$$

$$\cos\theta = \frac{\cos E - e}{1 - e\cos E} \quad . \tag{4}$$

当我们给出空间中双星轨道相对于观测者视线的方向之后，根据上述公式经过推导，非常容易得到由轨道运动产生的径向速度，表示为[38]：

$$V_{\rm rad} = \frac{2\pi a\sin i}{P(1-e^2)^{1/2}}[\cos(\theta+\omega) + e\cos\omega] \quad . \tag{5}$$

径向速度的最终表达式通常写成：

$$V_{\rm rad} = K[\cos(\theta+\omega) + e\cos\omega] + \gamma \quad , \tag{6}$$

其中，$K = \dfrac{2\pi a\sin i}{P(1-e^2)^{1/2}}$ 是速度曲线的半振幅，γ 是系统速度。如此，当我们知道一组双星的参数轨道周期 P，质量比 q，轨道偏心率 e，轨道倾角与视线方向夹角 i，进动角 ω，方位角 θ 以及主星质量 m_1，就可以画出双星的视向速度曲线。

如果我们有 n 次视向速度的测量，已知主质量 m_1 的情况下，我们用EMCEE软件包进行马尔可夫链蒙特卡罗模拟[32]。并且我们采用 MCMC 中随机抽取的概率最大值和 15%、85% 百分数作为轨道参数的最佳值以及它的不确定性，分别得到轨道周期 P，质量比 q，轨道偏心率 e，轨道倾角与视线方向夹角 i，进动角 ω，轨道零相位 θ。

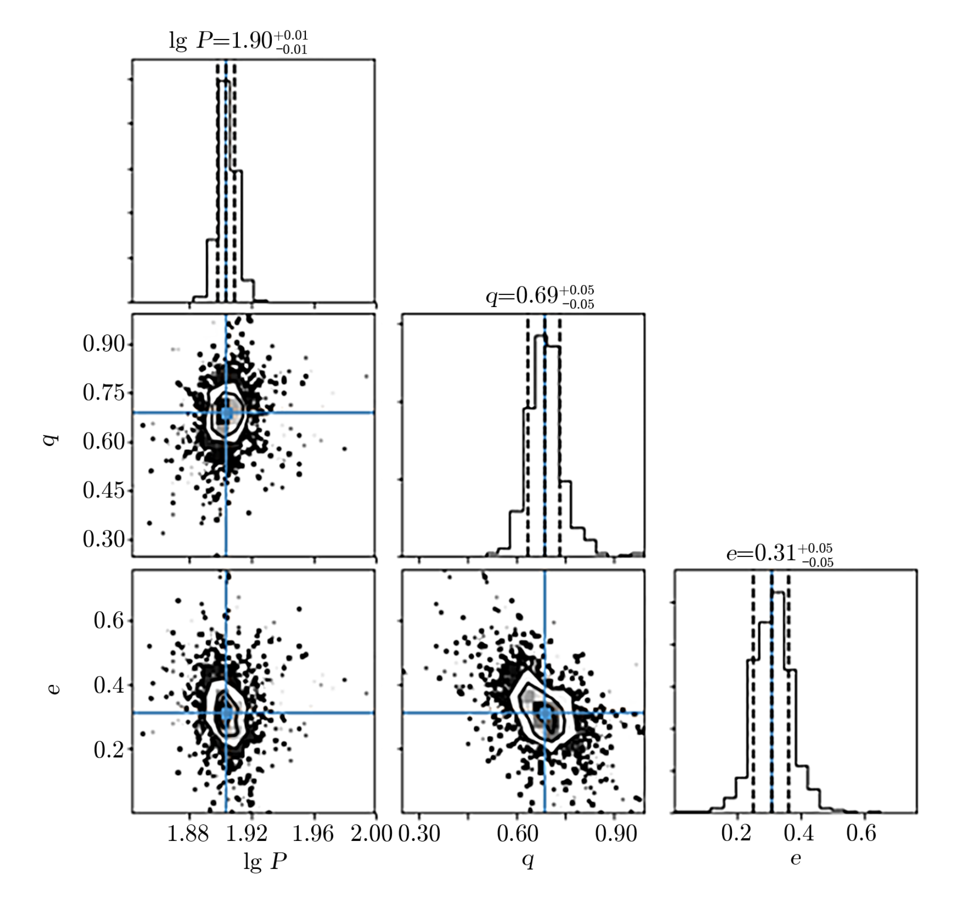
2.2　恒星质量的确定

我们通过比较每颗恒星的有效温度 ($T_{\rm eff}$)、表面重力 (lg g) 和金属丰度 ([Fe/H]) 与 PAdova and TRieste 恒星演化模型 (PARSEC)[34, 35]，通过 XGboost 算法估计每颗恒星的质量。我们使用 PARSEC 恒星模型提供的 $T_{\rm eff}$, lg g 和 [Fe/H] 作为训练数据，恒星质量作为训练标签，然后训练 XGboost 模型。具体的训练过程使用了均方根误差 (RMSE) 作为损失函数 (loss function)。经过独立的测试样本进行测试，我们发现测试数据集真实恒星质量与预测的恒星质量之间的均方根误差为 0.02 $M_\odot$。紧接着，我们使用 10 倍交叉验证 (cross-validation) 确认该算法带来的总体不确定度为 0.02 $M_\odot$[36]。

此外，我们使用蒙特卡洛方法估计了推算的每一个恒星质量的误差。具体过程是进行 1 000 次抽样，每次抽样从 $T_{\rm eff}$, lg g 和 [Fe/H] 的高斯分布中随机抽取一组新的值，以这些参数的测量值作为平均值，以它们的不确定度作为标准差。然后以这组抽样的参数通过训练好的 XGboost 模型估计恒星质量，进行多次测量以后，我们采用每组测量值的中位数作为推算的恒星质量，标准差作为恒星质量的误差。恒星质量的典型不确定度为 0.03 $M_\odot$ (中位数)。

2.3　方法的验证

首先，我们模拟一个恒星的情况。假设一颗已知其轨道周期、质量比和轨道偏心率的假星，然后估计其轨道参数，并且与这颗星预设的真值进行比较，从而可以确定该方法的准确性。当我们已知恒星的观测时间和视向速度时，将随机选择所有其他参数并运行 MCMC。lg P, q, e 可以很好地收敛到某个值 (见图 1)，该假星的轨道参数的真实值为 lg P=1.90, q=0.7, e=0.3, $m_1 = 1M_\odot$，观测次数为 20 次，在观测周期为 60 d 内均匀分布。

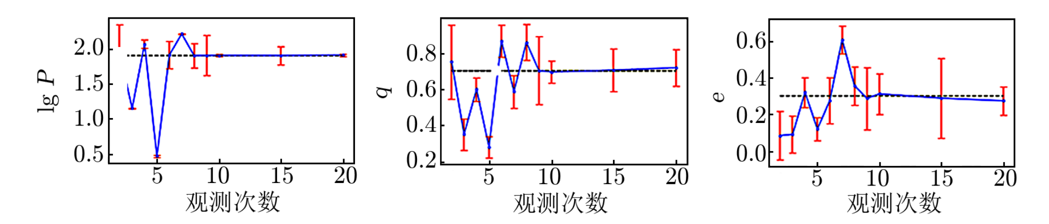


注：这颗模拟星的轨道参数的真实值为 lg P=1.90，q=0.7，e=0.3，假设有 10 次比较均匀的视向速度的测量，使用 EMCEE 软件包运行马尔可夫链蒙特卡罗模拟的 corner 图。

图 1　模拟星运行 MCMC 轨道参数的 corner 图

对于这样一颗恒星，我们模拟了随着观测次数的增加，轨道参数的模型给出的值与真实值的差别，如图 2 所示，观测次数范围 2 ~ 20 次，纵坐标为 lg P, q, e，黑色虚线是恒星的真实值，蓝色线是模型在不同观察时间下给出的值，红色是误差棒。可以看出，随着观测次数的增加，模型值越来越接近真实值，并且误差棒总体上趋于减小。由于双星的视向速度方程由 7 个参数控制，如果观测的数据点少于参数的数量，将很难得到可靠的拟合结果，由图中也可看出，当观测次数达到 8 次或 9 次时，模型值与真实值基本保持一致。

接下来，我们统计了 50 颗模拟星的情况，结果如图 3 所示。这 50 颗恒星的轨道周期 P 的范围为 10 ~ 100 d，质量比 q 的范围为 0.3 ~ 0.9，轨道偏心率 e 的范围为 0.1 ~ 0.7，$m_1 = 1M_\odot$，观测次数从4 ~ 20 次，前三幅图是模型给出的轨道参数 P, q, e 在不同观测次数下的误差，后三幅图是模型给出的轨道参数的误差的均方根。可以看到，随着观测次数的增加，轨道参数的误差在 0 上下浮动，误差的总体均方根随着观测次数的增加而减小。并且，如果我们能确定轨道周期 P，将其作为已知量代入模型中，其他轨道参数的估值会更接近真实值。



注：这颗模拟星的轨道参数的真实值为 lg P=1.90, q=0.7, e=0.3，观测次数从 2 次到 20 次，黑色虚线为模拟星轨道参数的真实值，蓝色线为模型给出的值，红色线为误差棒。

图 2　模拟星在不同观测次数下轨道参数模型值与真实值的差别

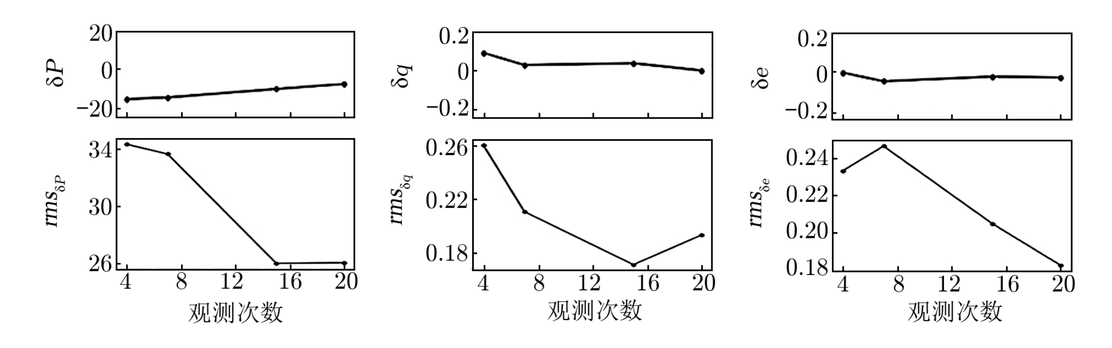


图 3　50 颗模拟星在不同观测次数下模型给出轨道参数的误差和误差的均方根

3　数　据

LAMOST 是一架新型的大视场兼备大口径望远镜，也叫郭守敬望远镜[27]。LAMOST 应用薄镜面主动光学加拼接镜面主动光学技术，在曝光 1.5 h 内可以观测到暗达 18 mag 的天体，使其成为大口径兼大视场光学望远镜的世界之最。同时，采用并行可控的光纤定位技术，在 5°视场上放置 4 000 根光纤，可以同时获得 4 000 个天体的光谱，使其成为世界上光谱获取率最高的望远镜[33]。

我们使用的是 LAMOST DR7 和部分 DR8 的中分辨率数据，使用蓝端的观测时间、观测速度及速度的误差，并且与 Chen 等人[1]WISE 食双星星表进行交叉，筛选出其中 LAMOST 光谱的信噪比大于 10 的，观测次数大于 8 次的星，共有 151 颗。我们将这 151 颗星代入模型中，主星质量 m_1 是由上述恒星质量确定的方法给出，将模型得出的周期 P 与 WISE 给出的周期进行比较。从图 4 可以看出，$\dfrac{P_{\rm WISE}}{P_{\rm LAMOST}}$ 值和 $\dfrac{P_{\rm LAMOST}}{P_{\rm WISE}}$ 值的分布大部分在 1 左右，少部分为 1/2, 2 和 3，说明我们模型给出的轨道周期值与 WISE 给出的基本一致，少部分为 2 倍周期或者 3 倍周期，所以我们认为 WISE 给出的周期值是基本可靠的。

由于 LAMOST 中分辨率给出的视向速度的观测点比较少，得到的周期缺乏可靠度，因此用 WISE 给出的基于光变曲线的周期进行接下来的双星轨道参数的测定，我们使用 WISE 给出的周期作为已知量代入模型中，在这 151 颗星中挑选出了视向速度的相位分布比较广

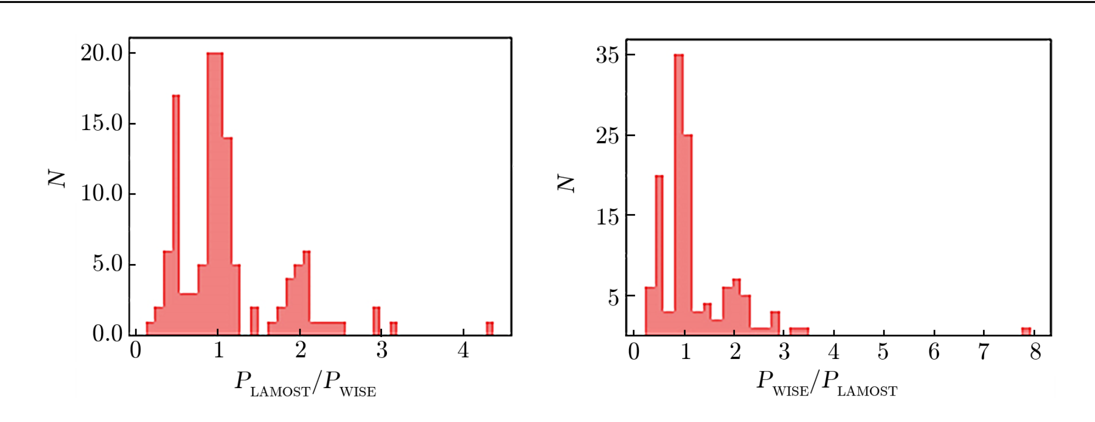


图 4 151 颗星模型给出的轨道周期与 WISE 的比较

并且比较均匀的，速度误差较小并且模型拟合出的速度曲线较好的 23 颗星。从 LAMOST 得到的这 23 颗星的有效温度 ($T_{\rm eff}$)、表面重力 (lg g) 和金属丰度 ([Fe/H]) 的分布见图 5，这一批星的有效温度 ($T_{\rm eff}$) 主要集中在 5 000 ~ 7 500 K 左右，表面重力 (lg g) 主要集中在 3.8 ~ 4.5 左右，金属丰度 ([Fe/H]) 集中在 −0.5 ~ 0.5 左右。

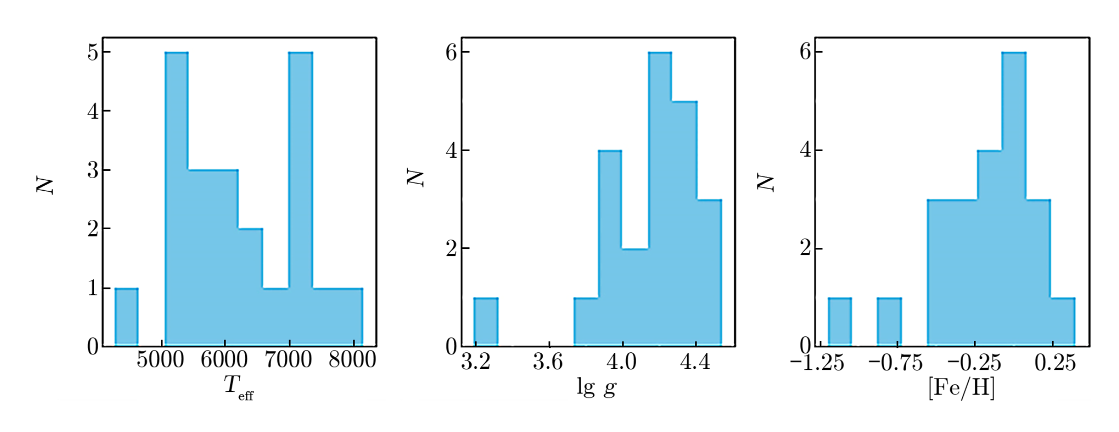


图 5 样本星的有效温度、表面重力和金属丰度的分布图

4 结 果

我们将 LAMOST 给出的 23 颗样本星的观测时间与视向速度代入模型中，同时将 WISE 给出的轨道周期 P 作为已知量代入模型中，主星质量 m_1 依然由上述方法确定，得到双星的轨道参数，发现由于 LAMOST 的视向速度的弥散比较大，因此算出的轨道参数不太准确，如轨道偏心率 e 整体较大，与实际不符。所以我们用章博等人改正过的 LAMOST 的视向速度 (已投稿，视向速度是由交叉星得到的)。由视向速度曲线进行拟合得到了这 23 颗星的轨道参数：轨道周期 P、质量比 q 和轨道偏心率e。表 1 列出这 23 颗样本星的轨道参数，轨道

表 1　23 颗样本星的轨道参数

WISEID	赤经 /(°)	赤纬 /(°)	m_1 /$M_\odot$	P /d	q	e	sin i	ω /(°)	$t0$ /d
J221437.8+281723	333.657 743	28.289 735	1.791 222 334	0.544 663 086	0.674 675 174	0.117 908 281	0.467 003 711	0.385 584 144	0.307 468 756
J230015.4+323333	345.064 241	32.559 297	0.964 101 195	0.307 457 918	0.771 423 729	0.134 800 612	0.661 073 991	4.396 511 295	0.293 132 962
J222153.3+280246	335.472 42	28.046 322	1.154 322 386	0.311 734 421	0.614 042 531	0.178 825 773	0.437 295 641	4.873 471 255	0.285 491 638
J040103.2+202449	60.263 484 7	20.413 963 3	1.630 368 352	0.433 540 559	0.315 522 722	0.125 607 523	0.627 727 929	3.285 437 746	0.237 562 117
J204052.3+401318	310.218 233 9	40.221 821 4	0.962 935 09	0.338 335 268	0.418 834 202	0.110 067 878	0.980 271 389	5.365 733 657	0.190 193 223
J171648.3+544614	259.201 471	54.770 727	1.172 252 417	0.357 660 936	0.259 209 749	0.034 664 043	0.689 417 293	3.982 060 061	0.112 464 325
J203105.2+384659	307.771 864 8	38.783 460 8	0.878 642 917	0.291 972 389	0.754 171 353	0.063 771 714	0.711 825 28	3.743 993 253	0.127 863 504
J220742.2+305001	331.926 057	30.833 772	1.168 613 911	0.357 928 71	0.528 989 381	0.032 529 128	0.687 251 366	2.872 689 2	0.207 469 489
J032504.4+584049	51.268 66	58.680 412	1.505 527 854	1.148 404 735	0.855 508 258	0.026 591 064	0.920 143 248	4.725 574 477	0.372 302 505
J064217.3+201648	100.572 397 4	20.280 096 7	1.180 399 656	0.381 615 04	0.519 390 486	0.119 354 769	0.771 086 436	2.740 711 246	0.324 431 755
J061214.7+220119	93.061 593 3	22.022 220 8	1.599 668 264	0.500 346 968	0.430 978 096	0.040 452 587	0.689 643 011	4.109 872 996	0.251 522 679
J171552.0+535927	258.966 533	53.991 001	1.018 016 815	0.295 575 713	0.313 229 203	0.082 219 462	0.821 019 562	4.858 314 482	0.104 740 702
J081117.4+525234	122.822 57	52.876 349	1.325 948	1.426 284 453	0.499 622 524	0.123 881 166	0.747 563 514	6.065 476 742	0.848 111 015
J085709.7+185643	134.290 445	18.945 561 7	1.209 726 81	0.289 473 27	0.293 928 349	0.077 281 358	0.682 556 723	3.248 759 612	0.133 671 144
J040934.9+500056	62.395 469 8	50.015 842 9	1.851 095 796	0.533 755 852	0.478 911 282	0.080 740 754	0.894 907 476	4.681 461 401	0.146 157 355
J153541.0+454435	233.920 788 9	45.743 264 8	1.155 333 996	0.337 701 936	0.156 531 208	0.073 787 444	0.104 889 245	2.964 687 634	0.240 060 529
J112924.7+010046	172.353 054v8	1.012 973 1	1.368 018 389	0.644 216v466	0.427 316 985	0.111 657 633	0.492 572 089	3.570 923 478	0.290 984 949
J090807.1+421220	137.03	42.205 59	1.174 523 711	0.460 734 182	0.719 662 643	0.096 506v832	0.908 854 483	5.824 416 701	0.272 872 997
J083747.3+110115	129.447 17	11.020 942	1.161 530 495	0.358 980 788	0.498 879 64	0.043 393 804	0.749 191 575	1.741 300 403	0.223 688 875
J013437.0+450938	23.654 478	45.160 768	1.041 315v079	0.434 317 927	0.344 549 981	0.034 879 339	0.879 507 178	0.252 046 384	0.263 450 885
J063546.1+192827	98.942 560 8	19.474 457	1.274 019 241	0.479 583 034	0.624 909 935	0.065 323 159	-0.296 568 863	2.412 327 744	0.304 982 161
J091415.2+192524	138.563 373 6	19.423 569 2	1.171 100 02	0.418 881 945	0.196 743 916	0.089 797 547	0.745 717 903	0.766 901 326	0.297 817 684

周期由 WISE 基于光变曲线的周期得到，质量比 q 如表 1 所示，并且它的平均不确定度约为 0.1，轨道偏心率 e 的平均不确定度约为 0.02。图 6 展示了这 23 颗星代入模型中得到的轨道参数对视向速度曲线的拟合情况。轨道周期 P、质量比 q 和轨道偏心率 e 的分布情况如图 7 所示，可以看出，轨道周期 P 是由 WISE 给出的，大部分小于 1 d，都是短周期的密近双星，分布呈现出幂律分布的趋势；质量比的分布整体比较平；轨道偏心率 e 由于动力学潮汐作用造成的轨道圆化，所以短周期的密近双星的轨道偏心率都比较小，模型给出的轨道偏心率也如预期，整体偏小，都在 0.2 以内。

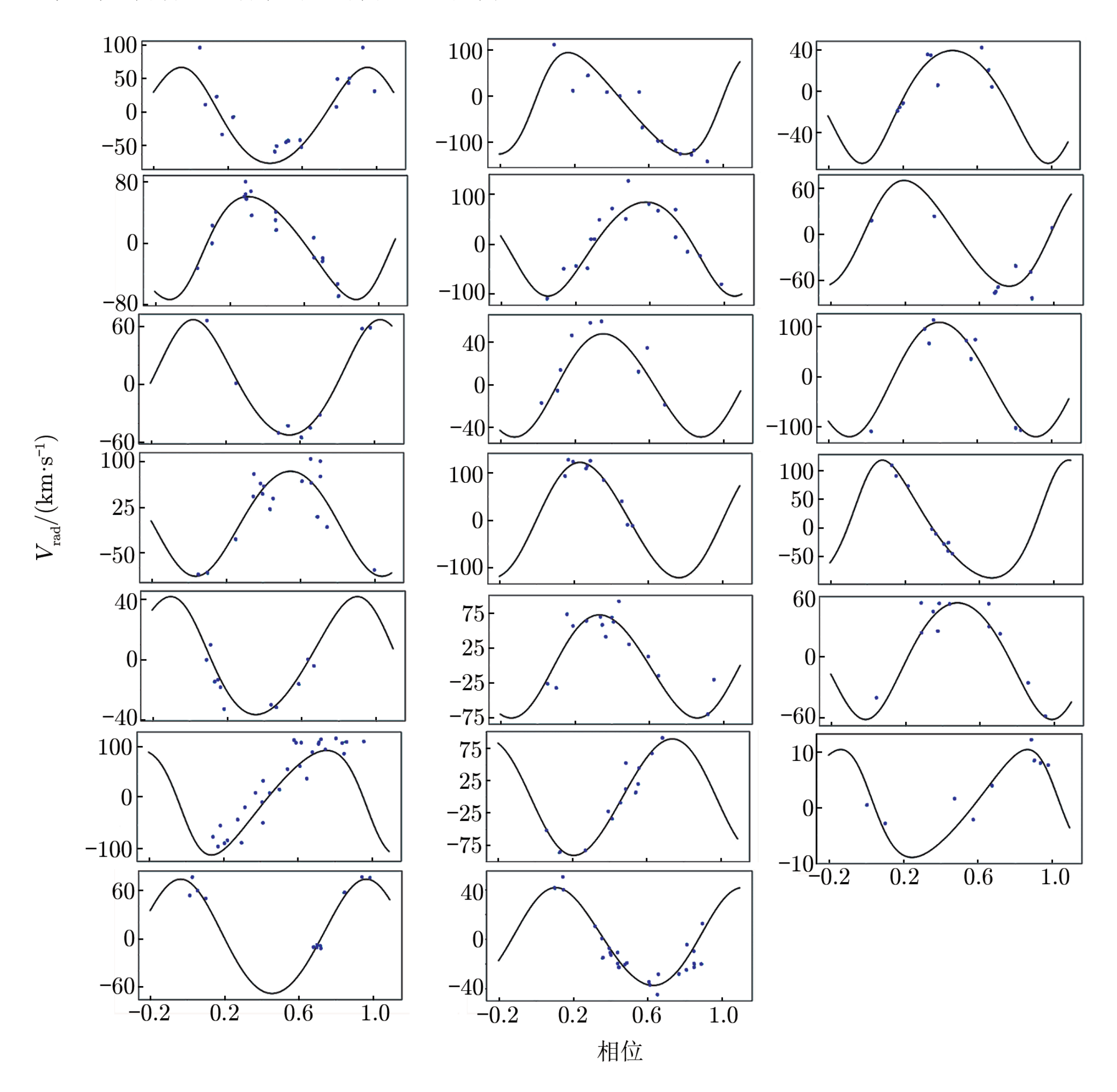


图 6　23 颗样本星的视向速度曲线拟合结果

接下来，将我们得出的结果与 Reghavon 等人[2] 的结果进行对比。我们画出了轨道周期与质量比及轨道偏心率之间的关系图 (如图 8 所示)，横坐标是轨道周期取 10 的对数 lg P，

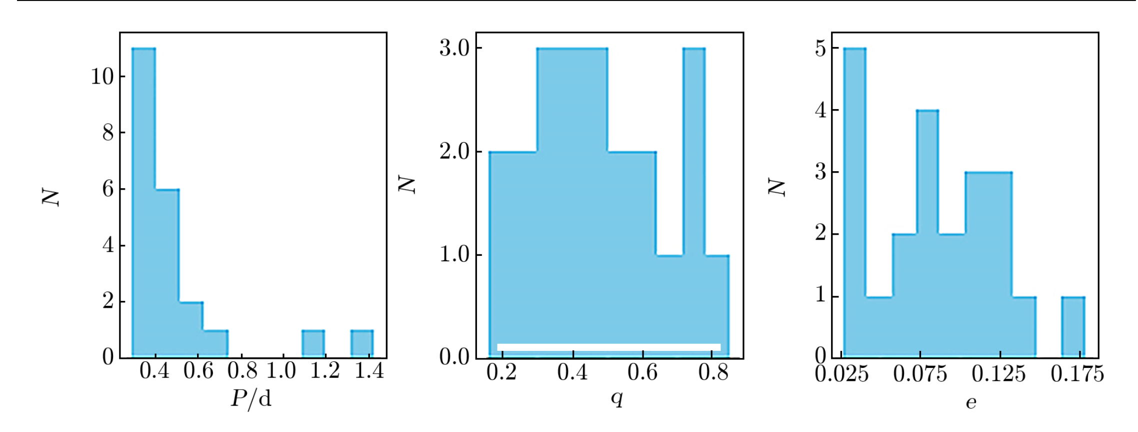


图 7　样本星的轨道周期、质量比和轨道偏心率的分布图

纵坐标分别为质量比 q 和轨道偏心率 e，在轨道周期 lg P 为 $-0.6\sim0.2$ 范围内，质量比 q 基本覆盖了整个 $0.1\sim0.9$ 的空间，并且整体趋向于比较大的值；但是轨道偏心率 e 都小于 0.2，并且大部分集中在 0.1 左右。

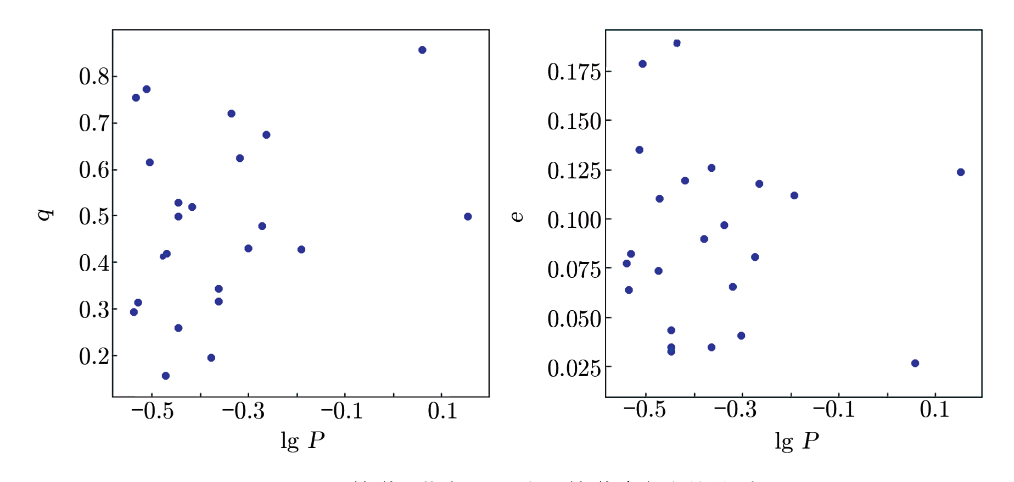
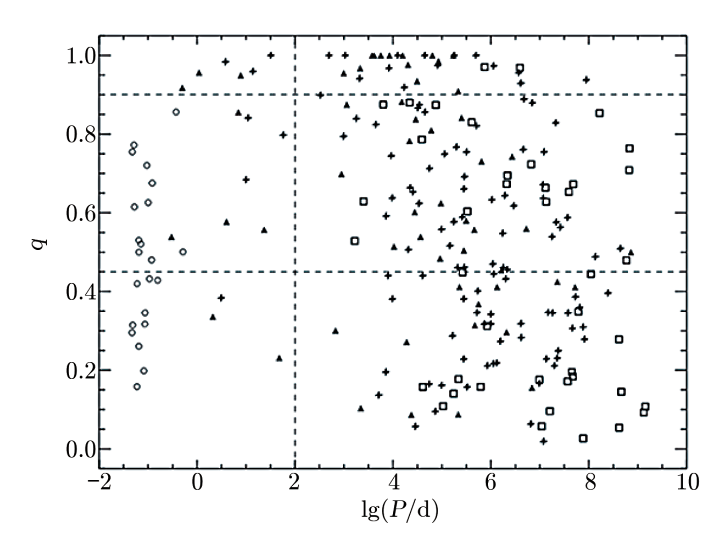


图 8　轨道周期与质量比及轨道偏心率的关系

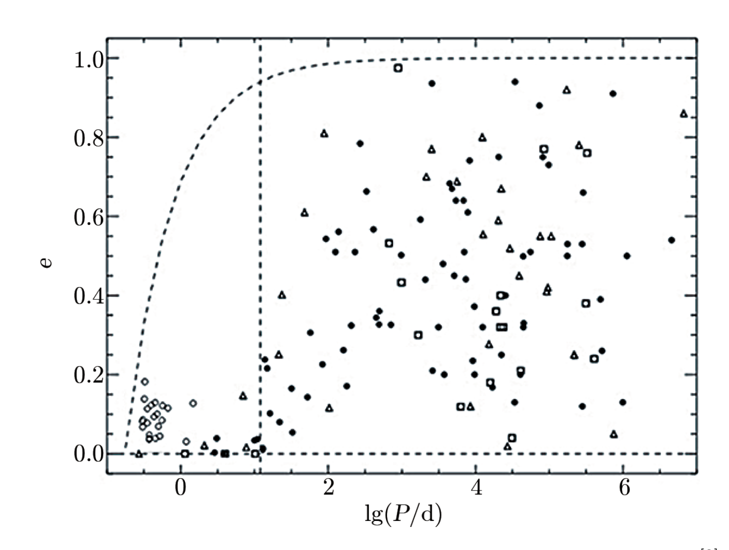
之后我们将图 8 的轨道周期与质量比和轨道偏心率分别与 Reghavon 等人[2]的结果进行对比。图 9 给出，轨道周期与质量比的关系，空心圆是我们的 23 颗短周期样本星，加号、实心三角形和空心正方形分别表示 Reghavon 等人[2] 样本中的双星系统、三星系统和四星系统，可以看出我们的结果与 Reghavon 等人[2]的结果基本一致，质量比基本覆盖全空间。

图 10 给出轨道周期与轨道偏心率的关系，同样，空心圆是我们的 23 颗短周期样本星，加号、实心三角形和空心正方形分别表示 Reghavon 等人[2]样本中的双星系统、三星系统和四星系统。曲线虚线代表一个偏心率的边界，在其左边，轨道过于扁，一颗伴星到另一颗伴星近星点的时候在 $1.5R_{\odot}$ 之内，因此很可能发生碰撞。我们的样本星的轨道偏心率都很小，都小于 0.2，在曲线内。



注：空心圆是我们的 23 颗短周期样本星，加号、实心三角形和空心正方形分别表示 Reghavon 等人[2] 样本中的双星系统、三星系统和四星系统。

图 9 轨道周期与质量比的关系



注：空心圆是 23 颗短周期样本星，加号、实心三角形和空心正方形分别表示 Reghavon 等人[2] 样本中的双星系统、三星系统和四星系统。

图 10 轨道周期与轨道偏心率的关系

5 总结与展望

我们使用了 LAMOST 中分辨率的 DR7 和部分 DR8 的数据，得到了 23 颗样本星。通过其视向速度测定了其轨道参数，轨道参数基本符合预期，结果如表 1 所示。除此之外，还存在一些问题。对于我们轨道参数的结果，尽管轨道偏心率 e 都在合理的范围内，但还是偏大一些，特别是图 6 中第一列的倒数第二张图，轨道偏心率还是比较大。这可能是由视向速度测量的误差造成的或者观测时间的采样相位不均匀造成的，这类问题希望后续通过对数据处理的精度提高和观测次数的增加来改善。未来，这类方法经过扩展可以变成一个层次化的贝叶斯模型，在不做单颗星的轨道参数的条件下还可以估计轨道的性质。

参考文献：

[1] Chen X D, Wang S, Deng L C, et al. APJS, 2018, 237: 28
[2] Raghavan D, McAlister H A, Henry T J, et al. ApJS, 2010, 190: 1
[3] Heintz W D. AJ, 1969, 74: 768
[4] Abt H A, Levy S G. ApJS, 1976, 30: 273
[5] Duquennoy A, Mayor M. A&A,1991, 248: 485
[6] Kopal Z. AnAp, 1955, 18: 379
[7] Kopal Z. LIACo, 1959, 9: 74
[8] Kuiper G P. PASP, 1935, 47: 15
[9] Kuiper G P. PASP, 1935, 47: 121
[10] Henry T J, McCarthy D W Jr. ApJ, 1990, 350: 334
[11] Fischer D A, Marcy G W. ApJ, 1992, 396: 178
[12] Mason B D, Gies D R, Hartkopf W I, et al. AJ, 1998, 115: 821
[13] Mason B D, Henry T J, Hartkopf W I, et al. AJ, 1998, 116: 2975
[14] Moe M, Kratter K M, Badenes C. ApJ, 2019, 875: 61
[15] Gao S, Liu C, Zhang X B, et al. ApJ, 2014, 788: 37
[16] Liu C. MNRAS, 2019, 490: 550
[17] Duchêne G, Kraus A. ARA&A, 2013, 51: 269
[18] Lucy L B. ApJ, 1968, 151: 1123
[19] Lucy L B. ApJ, 1968, 153: 877
[20] Mochnacki S W, Doughty N A. MNRAS, 1972a, 156: 51
[21] Mochnacki S W, Doughty N A. MNRAS, 1972b, 156: 243
[22] Rucinski S M. Acta Astr, 1973, 23: 79
[23] Hill G, Hutchings J B. ApJ, 1970,162: 265.
[24] Hutchings J B, Hill G. ApJ, 1971, 166: 373
[25] Hutchings J B, Hill G. ApJ, 1971, 167: 137
[26] Wilson R E, Devinney E J. ApJ, 1971, 166: 605
[27] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 1197
[28] York D G, Adelman J, Anderson J E, et al. AJ, 2000, 120: 1579
[29] Stoughton C, Lupton R H, Bernardi M, et al. AJ, 2002, 123: 485
[30] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. AJ, 2006, 131: 1163
[31] Lindegren L, Hernandez J, Bombrun A, et al. A&A, 2018, 616: 2

[32] Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. PASP, 2013, 125: 306
[33] Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 723
[34] Bressan A, Marigo P, Girardi L, et al. MNRAS, 2012, 427: 127
[35] Chen Y, Girardi L, Bressan A, et al. MNRAS, 2014, 444: 2525
[36] Chen T, Guestrin C. 2016, arXiv:1603.02754
[37] Hilditch R W. An introduction to close binary stars, Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 38
[38] Hilditch R W. An introduction to close binary stars, Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 42

Determination of Orbital Parameters of Binary Stars Based on Spectrum and Photometric Data

ZHANG Si-xuan[1,2], LIU Chao[1,2], LI Jia-dong[1,2]

(1. National Astronomical Observatiories of China, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Binary star systems or multi-star systems are a common result of stellar evolution. Therefore, the dependence of the stellar multiplicity and other properties of the binary star system on the primary mass and the stellar formation environment play important role in stellar evolution. There are many ways to study binary stars, such as the light curves method, the velocity curves method, and the Hertzsprung-Russell diagram method. In recent years, with the emergence of many large-scale astronomical survey observations, we have obtained a large amount of photometric and spectral survey data. For these large-scale survey data, many statisical methods have been developed to study the properties of binary stars. We use the WISE eclipse binaries with the medium-resolution spectra of LAMOST DR7 and part of DR8, and obtained 151 short period solar-type stars, and then selected those with more than 9 observations and relatively uniform phase distribution. By analyzing their radial velocities, the orbital parameters such as the orbital period, mass ratio, orbital eccentricity of this sample are obtained. We find that the period we obtained consistent with that given by WISE. Thus, we use the period of WISE as a known quantity to solve for other orbital parameters, which makes other orbital parameters more accurate. Among them, 23 stars were selected and the radial velocity curves are well fitted by binary models. The statistical properties of these parameters are consistent with the results of Ragavan et al. For stars with orbital period of less than 10 days, their mass-ratio basically covers the entire parameter space from 0.2 to 1, while their orbital eccentricities are very small, all smaller than 0.2.

Key words: binary stars; LAMOST; radial velocities; orbital parameters